

GESTIÓN Y PREVISIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS ALMACENADOS EN FORMA DE NIEVE EN LAS CORDILLERAS ESPAÑOLAS

GUILLERMO COBOS CAMPOS
Universidad Politécnica de Valencia
JUSTO MORA ALONSO-MUÑOYERRO
Confederación Hidrográfica del Tajo
CESAR FERRER CASTILLO
Confederación Hidrográfica del Ebro
MIGUEL ARENILLAS PARRA
Ingeniería 75, S.A.

RESUMEN

La Dirección General del Agua, dentro del programa ERHIN (Estudio de Recursos Hídricos derivados de la INnivación), ha centrado sus esfuerzos en el estudio de la cuantificación del volumen de agua almacena en forma de nieve, así como en la previsión de su evolución, todo ello encaminado a conocer la disponibilidad de recursos hídricos y a realizar una gestión optima de los embalses emplazados aguas abajo, tanto en situación ordinaria donde la principal finalidad es asegurar el abastecimiento y los caudales ecológicos, como en circunstancias extremas de avenida y sequía.

En la comunicación se expone la metodología que, desde hace años, se viene desarrollando y aplicando a los fines indicados.

1. INTRODUCCIÓN

La cuantificación de los recursos hídricos en forma de nieve tiene un indudable interés al corresponder a un sistema natural de regulación del flujo de agua; por ello en muchos países se vienen realizando en las últimas décadas estudios encaminados al análisis del comportamiento dinámico de estos recursos.

En España este fenómeno alcanza especial relevancia en las cuencas de cabecera de los Pirineos, la Cordillera Cantábrica, los Sistemas Central e Ibérico y Sierra Nevada, dominios que en general coinciden con áreas que estuvieron ocupadas por los hielos durante la última glaciación (Würm).

Las condiciones meteorológicas de estas áreas montañosas, así como sus características geográficas y geomorfológicas hacen que el fenómeno nival se presente, con cierta importancia, durante periodos muy concretos del año hidrológico (entre diciembre y mayo), con una gran variabilidad espacio-temporal, según las zonas. La incorporación a la red fluvial de estos recursos hídricos se produce de dos modos fundamentales:

- En determinadas cuencas la precipitación nival alcanza valores significativos durante el invierno, que conducen a espesores de nieve persistentes y a la fusión de esta nieve en primavera, que se va incorporando paulatinamente a los embalses a modo de esorrentía (situación ordinaria de regulación). Es la situación propia de casi todas las áreas montañosas españolas y la característica más significativa del Pirineo y Sierra Nevada.
- En algunos casos (situaciones climatológicas muy concretas con aumento rápido de la temperatura, combinado con lluvias), puede producirse una fusión importante de la nieve en períodos cortos de tiempo, dando lugar a elevados caudales en los cauces fluviales (avenidas).

2. EL PROGRAMA ERHIN

Hace veinte años la entonces Dirección General de Obras Hidráulicas (hoy Dirección General del Agua), consciente de la importancia del fenómeno nival en la gestión de los recursos hídricos, puso en marcha el programa ERHIN (Estudio de Recursos Hídricos procedentes de la Innivación) con objeto de cuantificar los indicados procesos y facilitar con ello la gestión de los embalses situados al pie de las principales cordilleras del territorio español.

En el año 1986, el ámbito de actuación se fijó en el Pirineo, y posteriormente se amplió a la Cordillera Cantábrica (1987), Sierra Nevada (1990) y Sistema Central (1996).



Figura 1. Izquierda: instalación de una pértiga en la Cordillera Cantábrica
Derecha: Telenivómetro instalado en el Sistema Central

Han sido numerosas las actividades llevadas a cabo dentro del Programa ERHIN; entre ellas cabe destacar la instalación de una red fija de medición de espesores del manto nival, formada por pértigas y telenivómetros (ver figura 1), realización de campaña de campo para toma de datos (espesores y densidades), utilización de imágenes satélite para la cuantificación de las superficies innivadas, realización de estudios para la aplicación de métodos hidrológico-estadísticos para la cuantificación de nieve acumulada y previsión de aportaciones, desarrollo de modelos de simulación hidrológica para la gestión de embalses de cabecera y su integración con

el SAIH (Sistema Automático de Información Hidrológica) para facilitar el acceso a la información en tiempo real y la publicación de los resultados obtenidos.

Concretamente, en el Pirineo la superficie donde este fenómeno es relevante se extiende a 11.000 km², habiéndose instalado 113 puntos de control de espesor nival (pértigas) entre 1986 y 1987. En el caso de la Cordillera Cantábrica la superficie controlada asciende a 15.700 km² y los puntos de control a 127 pértilas, instalados entre los años 1989 y 1990. En Sierra Nevada se dispone de 24 pértilas desde 1990, que representan una superficie de 1.700 km². En el caso del Sistema central, en el año 2000 se han colocado 4 telenivómetros (estaciones de control de espesor y densidad nival con sistema de transmisión automático en tiempo real) conectados al SAIH, para una superficie de 16.800 km² (ver figura 2).

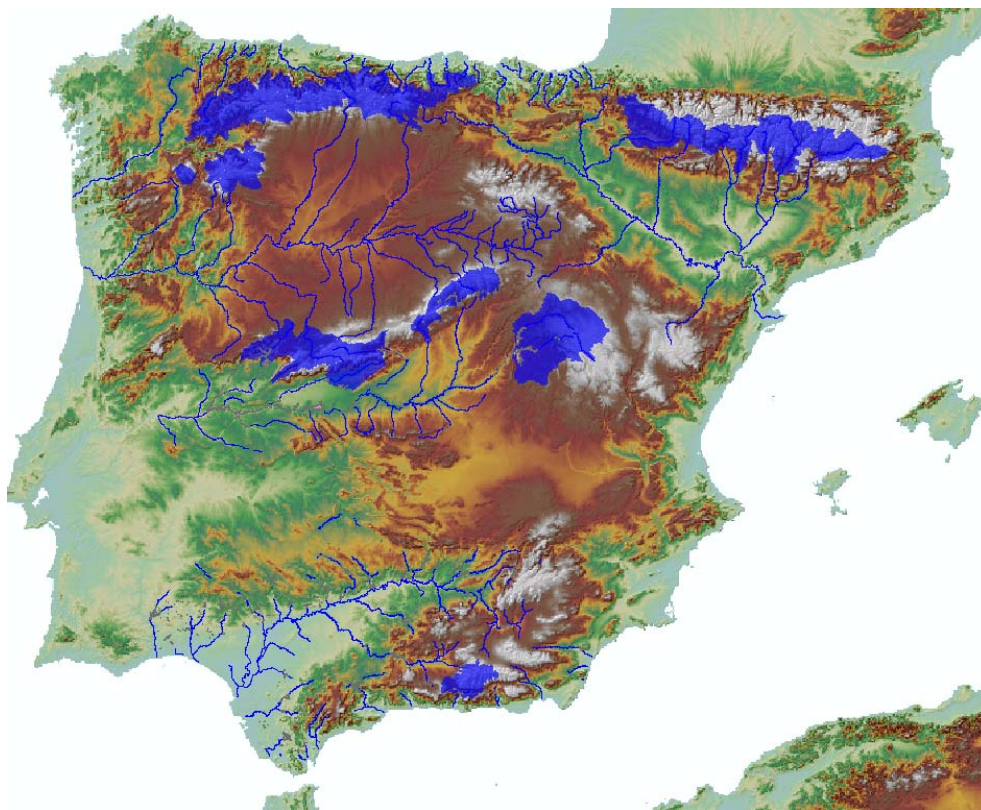


Figura 2. Área del territorio español (en azul) donde se estudian los recursos hídricos procedentes de la acumulación nival. Programa ERHIN

A partir de todos estos trabajos se ha desarrollado una metodología que permite la cuantificación de todo el proceso y facilita la gestión de los embalses de cabecera afectados.

3. EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS PROCEDENTES DE LA INNIVACIÓN

3.1 METODOLOGÍA

La metodología desarrollada ha conducido a un modelo único de gestión del sistema (1) que tiene como objetivo principal la compatibilización de los datos nivales obtenidos del análisis de las mediciones directas y la fotografía satélite con los resultados nivales calculados por un modelo hidrológico de simulación a partir de datos meteorológicos. Además se ha desarrollado un procedimiento de cálculo (aplicable en tiempo real) que, partiendo de unas previsiones meteorológicas, proporciona los resultados más probables de la evolución del manto nival y de

las aportaciones provenientes de su fusión. Como es lógico, estos resultados son los que facilitan la gestión de los embalses, tanto en situación ordinaria, como en circunstancias extraordinarias.

En esencia, esta metodología se basa en dos modelos conceptuales diferentes. El primero es el modelo de simulación hidrológica (precipitación-escorrentía) y el segundo un modelo geoestadístico que permite la cuantificación del manto nival para una fecha en la que se disponen de observaciones nivales (mediciones de campo y fotografía satélite). Estos dos modelos están sustentados sobre un mismo soporte de trabajo dando lugar al modelo conjunto (ver fig. 2).

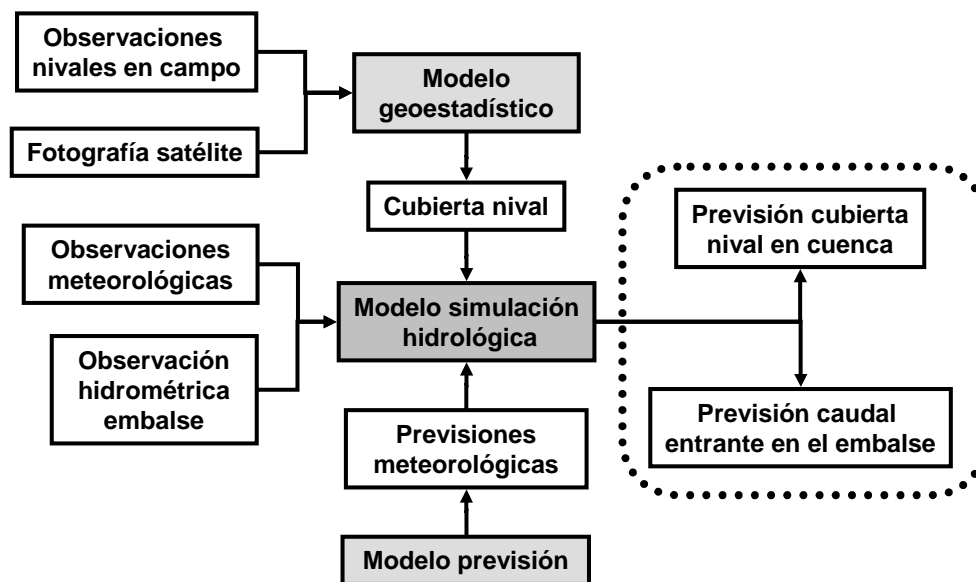


Figura 3. Esquema detallado de la metodología aplicada para la cuantificación de los recursos hídricos procedentes de la innivación

Para la simulación hidrológica se ha seleccionado el modelo distribuido de simulación continua denominado ASTER, desarrollado específicamente para su aplicación en cuencas con relieves abruptos, y con cambios meteorológicos muy marcados en el tiempo y en el espacio. Como principales ventajas del modelo debe destacarse la posibilidad de poder seleccionar las resoluciones espaciales y temporales para la simulación en función de las necesidades del usuario, el tratamiento desagregado que hace de las variables precipitación y temperatura y el análisis específico del fenómeno nival.

El modelo geoestadístico desarrollado para el tratamiento de la información nival se soporta sobre un SIG y permite realizar un tratamiento de la información puntual (pértigas y telenivómetros) y areal (fotografía satélite) mediante la aplicación de la siguiente expresión.

$$CEA_i = F(x, y, f(cota), T, t)$$

Donde:

- CEA_i – Columna equivalente de agua para un punto $i(x, y, z)$ de la cuenca estudiada.
- F - Función de interpolación seleccionada.
- $f(cota)$ – Ley de innivación que tiene en cuenta de forma determinista la variabilidad del volumen de agua en forma de nieve con respecto a la cota.
- T – Procedencia del dato.
- t – Instante temporal.

Diseñado este modelo conjunto, la simple inclusión de una hipótesis meteorológica (precipitación y temperatura), permite realizar previsiones de la evolución de la cubierta nival y los caudales circulantes por el punto de control.

3.2 GESTION DE LA INFORMACIÓN

Dado que existen diversos orígenes de información para el modelo integrado que se plantea, como son el modelo digital del terreno (MDT), el propio modelo hidrológico distribuido, las estaciones hidro-meteorológicas, la fotografía satélite y las pértilas o telenivómetros de medida de nieve en campo, ha sido necesario plantear un sistema preciso, pero sencillo, para su organización y gestión. Para ello, se ha adoptado un Sistema de Información Geográfica (ver figura 4), que se ha desarrollado sobre Arc Map.

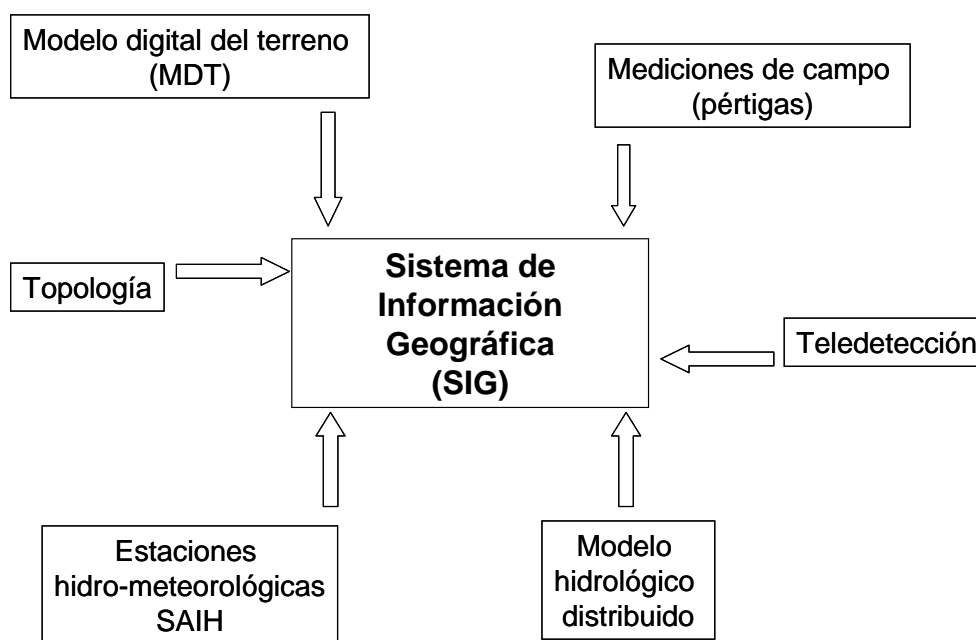


Figura 4. Esquema del sistema de gestión de la información

El SIG permite un tratamiento ágil y efectivo especialmente en el caso de la cubierta nival, íntimamente relacionada con la morfología del terreno, donde se puede disponer de información puntual (medidas de campo) y areal (fotografía satélite).

3.3 CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

El modelo planteado hace necesario el desarrollo de una metodología para el tratamiento conjunto de la información proporcionada por el modelo geoestadístico y el modelo hidrológico, todo ello dirigido a optimizar los resultados alcanzados en la simulación de la cubierta nival y los caudales derivados de la fusión.

El modelo hidrológico proporciona una información continua del estado de la cubierta nival y los caudales circulantes en el punto de control, mientras que el modelo geoestadístico permite calcular el estado de la cubierta nival para el día en que se dispone de los datos observados en la campaña nival y la correspondiente fotografía satélite. Por otro lado, la estación (un embalse, normalmente) emplazada en el punto de control permite conocer los caudales circulantes por

dicho punto. Esto implica que se dispone para la calibración de información del manto nival y de los caudales fluyentes.

Para la calibración del modelo se ha diseñado una metodología de optimización de los parámetros que rigen el comportamiento del modelo hidrológico a partir de los resultados del modelo geoestadístico y los caudales observados en el punto de control.

En primer lugar, se propone un ajuste del modelo atendiendo al estudio comparativo entre la distribución espacial del manto nival (espesor y densidad, o su equivalente en columna de agua líquida) calculada por el modelo y la obtenida a partir de las mediciones de campo y la fotografía satélite. Esta optimización se debe realizar considerando la distribución espacio-temporal de la cubierta nival, que para cada cuenca vendrá condicionada por la resolución espacial escogida para el modelo distribuido. Como función objetivo (criterio de optimización) en este caso se ha adoptado la minimización del error cuadrático entre los resultados proporcionados por el modelo hidrológico y el geoestadístico, extendido a todo el modelo distribuido, tal y como queda representado en la siguiente expresión.

$$F.Objetivo = \min \sum_{a=1}^f \left(\sum_{i=1}^n (VAFN_i^{M.Simulación} - VAFN_i^{M.Geoestadístico})^2 \right)_a$$

Donde:

- $VAFN_i^{M.Simulación}$ - Volumen de agua en forma de nieve obtenido a partir del modelo hidrológico de simulación para la celda i y la fecha a.
- $VAFN_i^{M.Geoestadístico}$ - Volumen de agua en forma de nieve obtenido a partir del modelo geoestadístico para la celda i y la fecha a.
- n – número de celdas del modelo distribuido que representa la cuenca.
- f – Número de fechas para las que se dispone de observaciones del manto nival.

Ajustados los parámetros que condicionan la evolución de la cubierta nival se plantea el estudio comparativo, para la resolución temporal adoptada, entre los caudales fluyentes registrados en el punto de control y los calculados por el modelo hidrológico para el mismo lugar del cauce. En este caso la función objetivo adoptada es la minimización del error cuadrático entre los resultados de caudales observados y calculados, extendida a todo el periodo de simulación incluido en la fase de calibración.

$$F.Objetivo = \min \sum_{i=1}^m (Q_i^{observado} - Q_i^{calculado})^2$$

Donde:

- $Q_i^{observado}$ - caudal observado en el punto de control en el instante i.
- $Q_i^{calculado}$ - caudal calculado por el modelo hidrológico en el punto de control en el instante i.
- m – número de instantes para los que se realiza la simulación.

Concluida la fase de calibración, el modelo permite incorporar el estado espacio-temporal de la cubierta nival calculado a partir del modelo geoestadístico para posteriores mediciones (fuera del periodo de simulación) en el modelo hidrológico, para eliminar los posibles errores acumulativos en el cálculo de las reservas hídricas disponibles en forma de nieve.

3.4 CONCLUSIONES

Se ha conseguido diseñar un modelo nival que permite incluir toda la información referente a dicho fenómeno y que en cada momento podrá ser adaptado a la información disponible y a las nuevas técnicas que se desarrollen y apliquen (imágenes satélite obtenidas mediante sensores ópticos, densidades y espesores obtenidos de sensores activos, telenivómetros, etc.).

Esta estructura permite una previsión continua del fenómeno nival (estado del manto nival y escorrentías procedentes de la fusión), así como su calibración a partir en los datos observados (sistemas de información hidrológica, mediciones de campo, telenivómetros, fotografía satélite, etc.), reduciendo al máximo aquellas desviaciones que se pueden producir entre la situación real y la simulada, que en el caso de la nieve son acumulativas.

El modelo también permite la corrección en tiempo real del estado de la cobertura nival calculada a partir de las observaciones realizadas.

Con todo ello, se considera que la metodología propuesta proporciona una información nival precisa y muy útil para ayudar a la gestión de los embalses emplazados en cuencas afectadas por este fenómeno, ya que permite estimar el volumen de agua almacenado en forma de nieve aguas arriba del embalse y la evolución temporal de los caudales fluyentes procedentes de su fusión, variables imprescindibles para el responsable de la explotación (ver figura 5).

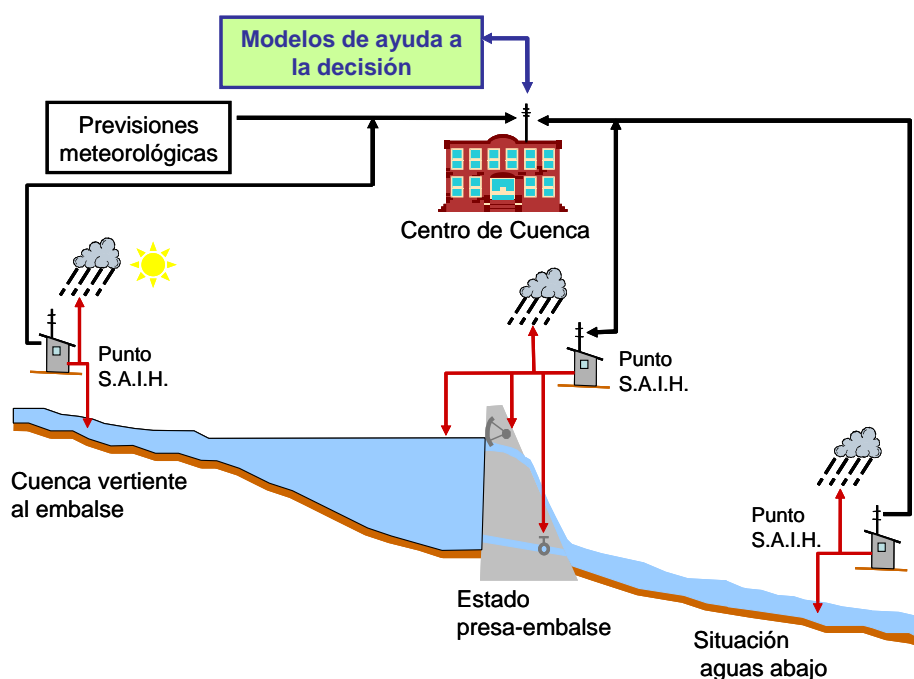


Figura 5. Esquema de la integración del modelo propuesto en la gestión de los recursos hídricos

Por todo ello, en el territorio español, dentro del programa ERHIN se está procediendo a la implantación de esta metodología para facilitar la gestión de los embalses de cabecera, tanto en situación ordinaria como extraordinaria y conseguir una gestión óptima de los recursos disponibles.

4. RESULTADOS ALCANZADOS

Los resultados alcanzados en la cuantificación de los recursos hídricos procedentes de la innivación, dentro del programa ERHIN y para cada una de las grandes cordilleras españolas, se citan a continuación.

4.1 PIRINEO

La cuenca del Ebro tiene una superficie de 85.000 km², de la que algo más de un 10% se encuentra afectada de forma significativa por el fenómeno nival. Esta área se corresponde con las cuencas cuya cabecera se sitúan en el Pirineo, donde se vienen realizando anualmente un máximo de tres campañas de campo (ver figura 6) desde 1987. Estas cuencas de cabecera representan una fracción muy importante del total de las aportaciones de la cuenca del Ebro (2).

Del análisis de estas mediciones se ha concluido que las reservas hídricas medias acumuladas en forma de nieve comienzan a ser significativas en noviembre, aumentan progresivamente hasta mediados de marzo, que es cuando se inicia la fusión lenta de la nieve, acelerándose el proceso a finales de abril y prolongándose hasta casi vencido el mes de julio. El máximo registro se corresponde a febrero de 2003, con unas reservas que ascendieron a 2.880 hm³ de agua acumulada en forma de nieve.



Figura 6. Segunda medición invernal del Pirineo español del año 2004

Conocidos los puntos de control de caudales instalados en la cuenca del Ebro y el área afectada por el fenómeno nival se han delimitado las cuencas donde actualmente se aplica el modelo ASTER (ver tabla 1).

Tabla 1. Cuencas modelizadas con ASTER en el Pirineo

Subcuenca	Punto de cierre de la cuenca	Superficie (km ²)
Aragón	Embalse de Yesa	2.166
Gallego	Embalse de Bubal	295
Ara	Estación de aforo de Boltaña	615
Cinca	Estación de aforo de Escalona	794
Ésera	Estación de aforo de Campo	542
Noguera Ribargorzana	Embalse de Escalles	566

Subcuenca	Punto de cierre de la cuenca	Superficie (km ²)
Noguera Pallaresa	Confluencia con el río Santa Magdalena	1.149
Segre	Estación de aforo de Seo de Urgel	1.789
Garona	Bossost	476

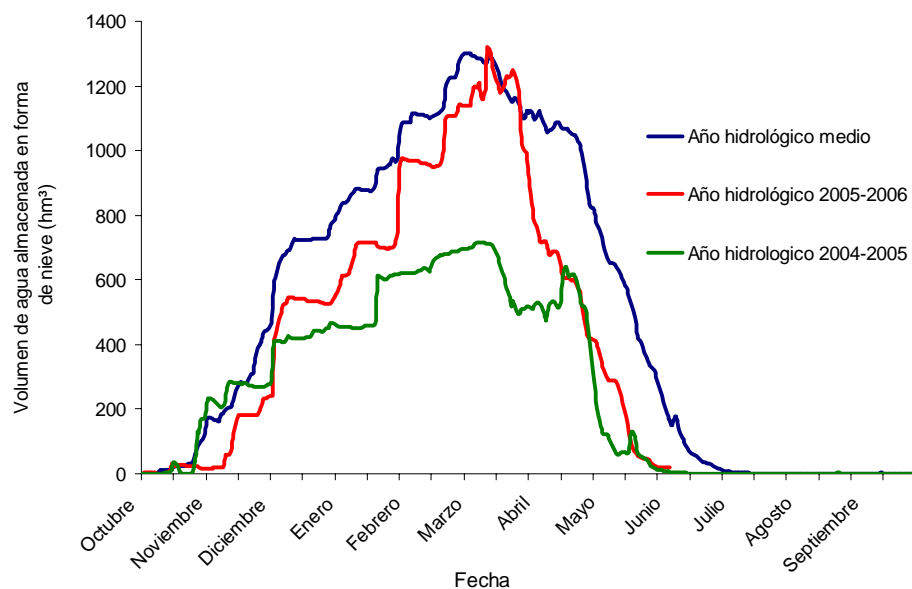


Figura 7. Evolución del agua acumulada en forma de nieve para las cuencas del Pirineo modelizadas con ASTER

En la figura 7 se puede apreciar la evolución de la nieve acumulada en el Pirineo español para los dos últimos años hidrológicos y su comparación con el año medio (serie de 19 años). En primer lugar se ve de forma muy clara que para el año 2004-2005 la nieve acumulada en forma de nieve en el Pirineo fue muy escasa en todo momento, llegando a ser la mitad de la habitual para el período de máxima acumulación (febrero-mayo). En el caso del año hidrológico 2005-2006, aunque la acumulación máxima es muy próxima a la media, la fusión se ha producido muy rápidamente, adelantándose el aporte de caudales a los cursos fluviales al menos en un mes, respecto a la situación habitual. En este caso el efecto regulador de los recursos hídricos ha sido mucho menor del esperado.

4.2 CORDILLERA CANTABRICA

Se viene realizando anualmente una media de dos campañas de campo desde el año 1990, que en los tres últimos años han sido apoyadas por imágenes de teledetección (ver figura 8).

El histórico de mediciones ha permitido cuantificar las reservas hídricas para un año medio. Concretamente, a finales de enero o inicios de febrero los recursos almacenados ascienden a unos 500 hm³, valor similar al registrado a mediados de marzo, y disminuyen a 400 hm³ a finales de abril, momento en el que la fusión se produce de una forma muy rápida. El valor histórico máximo calculado a partir de las mediciones se corresponde a marzo de 2005, donde las reservas ascendieron a 2.080 hm³ de agua acumulada en forma de nieve.

En el caso de la Cordillera Cantábrica, la variabilidad espacio-temporal de la cubierta nival es mucho mayor que en el caso del Pirineo, lo que refleja fluctuaciones térmicas significativas a lo largo del año.

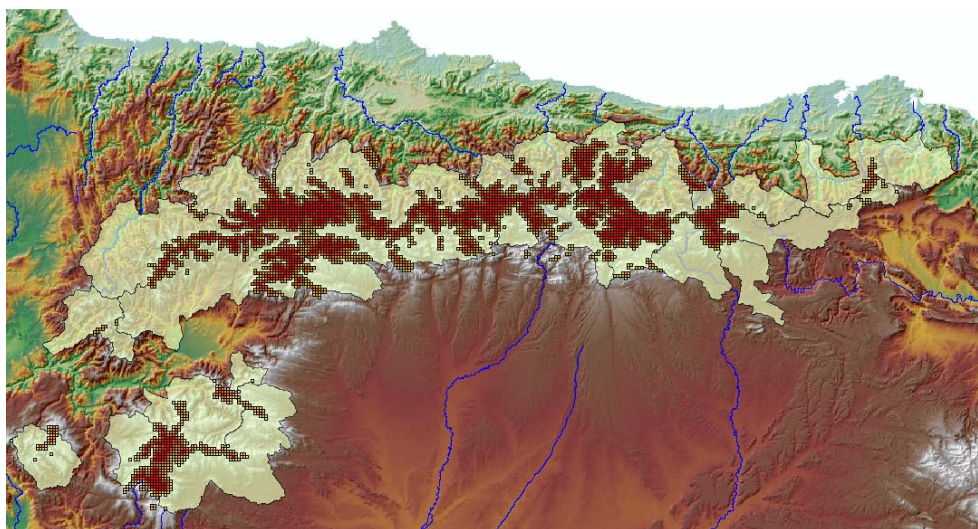


Figura 8. Cubierta nival obtenida a partir de imagen satélite para la Cordillera Cantábrica.
Fecha: 14-3-2006 La cubierta nival está representada en escala de rojos sobre las cuencas estudiadas dentro del programa ERHIN (en amarillo)

4.3 SISTEMA CENTRAL

En esta cordillera, la superficie afectada es muy amplia, pero las cotas del terreno son relativamente bajas, lo que hace que habitualmente las reservas hídricas almacenadas en forma de nieve no sean elevadas. No obstante, en circunstancias concretas, pueden ocupar una gran superficie y por lo tanto dar lugar a importantes volúmenes de nieve, que funde rápidamente frente a un aumento de las temperaturas, provocando el correspondiente incremento de los caudales circulantes en los cauces fluviales.

También en esta cuenca se han desarrollado los correspondientes modelos ASTER (ver tabla 2) en las respectivas subcuencas. Actualmente estos modelos se encuentran integrados en el SAIH del Tajo lo que permite realizar previsiones de la evolución del manto nival y de los caudales circulantes.

Tabla 2. Cuencas modelizadas con ASTER en el Sistema Central (Confederación Hidrográfica del Tajo)

Subcuenca	Estación de cierre	Superficie (km ²)
Alagón en Gabriel y Galán	Emb.de Gabriel y Galán	1.785
Jerte en Plasencia	Emb. de Jerte-Plasencia	365
Tietar en Rosarito	Embalse de Rosarito	1.725
Alberche en el Burguillo	Embalse de el Burguillo	1.034
Guadarrama en Picotejo	Guadarrama en Picotejo	346
Manzanares en Santillana	Emb. Manzanares El Real	240
Lozoya en el Atazar	Embalse de El Atazar	905
Jarama en el Vado	Embalse de El Vado	340
Sorbe en Beleña	Embalse de Beleña	465

Subcuenca	Estación de cierre	Superficie (km ²)
Bornova en Alcorl6	Embalse de El Alcorl6	320
Alto Tajo en Entrepeñas	Embalse de Entrepeñas	3.765
Guadiela en Buendía	Embalse de Buendía	3.300

Los modelos hidrol6gicos son complementados por la informaci6n proporcionada por los teleniv6metros y las im6genes sat6lite. Adicionalmente, se han realizado campa±as de campo con medici6n de espesores y densidades en los 6ltimos a±os. El m6ximo registro se corresponde a enero de 1996 con un volumen de 530 hm³ de agua almacenada en forma de nieve.

4.4 SIERRA NEVADA

En este caso la superficie total afectada de un modo notable por la innovaci6n es mucho m6s reducido que los casos anteriores. No obstante hay dos cuencas en las cuales tienen una gran relevancia los recursos almacenados en forma de nieve, la cuenca del r6o Genil vertiente al embalse de Canales (ver figuras 9 y 10) y la cuenca del r6o Guadalfeo vertiente al embalse de Rules. Ambas cuencas se ha modelizado con el programa ASTER, alcanzando buenos resultados en la estimaci6n de los vol6menes almacenados en forma de nieve y la cuantificaci6n de los caudales fluyentes procedentes de su fusi6n.

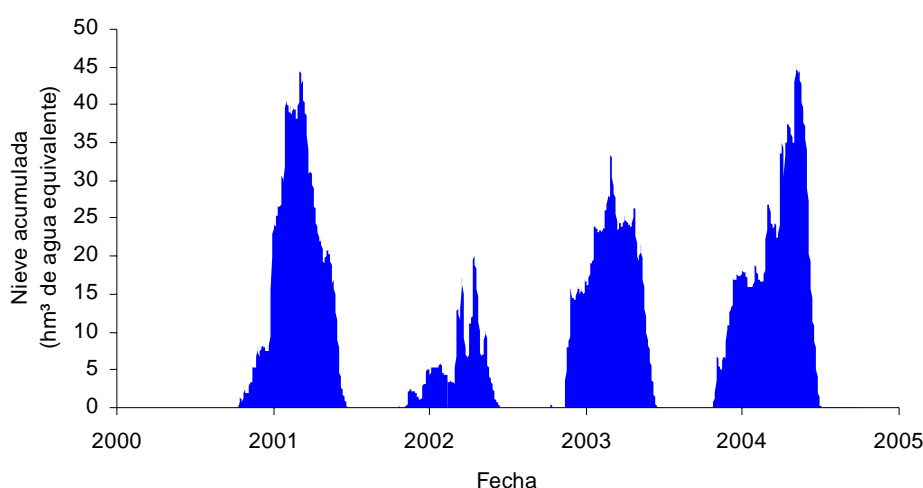


Figura 9. Resultados de acumulaci6n nival obtenidos de la aplicaci6n del modelo ASTER para la cuenca del r6o Genil vertiente al embalse de Canales. A±os 2000-2004

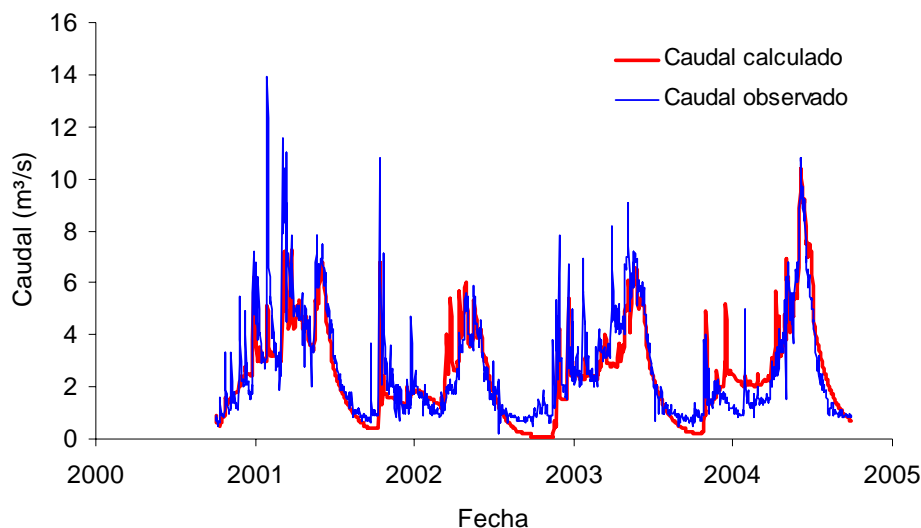


Figura 10. Resultados de aportaciones entrantes al embalse de Canales obtenidos con la aplicación del modelo ASTER
Años 2000-2004

Se vienen realizando anualmente una media de dos campañas de campo desde el año 1990, que en los tres últimos años han sido apoyadas por imágenes de teledetección.

El valor máximo calculado (para toda la superficie controlada) a partir de las mediciones se corresponde a febrero de 1997, donde las reservas ascendieron a 270 hm³ de agua acumulada en forma de nieve.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Cobos G. (2004). Cuantificación de las reservas hídricas en forma de nieve y previsión en tiempo real de los caudales fluyentes derivados de la fusión. Awplicación al Pirineo Español: cuenca alta del río Aragón. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- (2) Mora J., Ferrer C., Arenillas M., Cobos C. (2004). Hydrological peculiarities of mountain basins. The case of the Spanish Pyrenees. International Conference on Water Observation and Information System for Decision Support. Macedonia.
- (3) Ferrer, C., Romeo, R., Arenillas, M., Cobos, G. (2002). El Sistema ASTER-SAIH aplicado a la explotación de embalses en cuencas con marcado comportamiento nival. VII Jornadas Españolas de Presas. Zaragoza.